

# 含气孔缺陷的管道环焊缝应力分析

李燕<sup>1</sup>, 帅健<sup>1\*</sup>, 隋永莉<sup>2</sup>, 许葵<sup>1</sup><sup>1</sup> 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249<sup>2</sup> 中国石油天然气管道科学研究院, 廊坊 065000

\* 通信作者, shuaij@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-11-15

国家科技支撑计划项目(2015BAK16B02)资助

**摘要** 焊接质量控制是油气管道安全运营的重要保障。对于高强钢管道, 焊接缺陷的尺寸控制是当前管道施工中的瓶颈问题。在管道对接焊这一关键施工环节中, 环焊缝气孔缺陷的形成实难避免。为了研究其尺寸控制指标的适用性, 根据实际管道环焊缝的坡口形状和热影响区材料的软化现象, 建立了非线性有限元分析模型。以管道设计标准为依据, 确定了管道环焊缝应力分析的极端载荷条件, 并采用基于流动应力的失效判据, 对含气孔缺陷的管道环焊缝进行了应力分析。结果表明, 不同径向位置气孔的管道环焊缝应力水平相当, X90 钢级管道对环焊缝气孔缺陷的容限能力低于 X80 钢级管道, 现行标准中关于气孔缺陷的 3 mm 尺寸控制指标适用于 X80 和 X90 钢级环焊缝管道。

**关键词** 环焊缝管道; 气孔缺陷; 极端载荷条件; 应力分析; 缺陷尺寸

## 0 引言

环焊缝焊接是管道施工建设中的关键环节<sup>[1]</sup>, 受焊接工艺和外界环境的影响, 金属在熔化和凝固过程中不可避免的会产生滞留气体, 进而形成气孔缺陷<sup>[2-4]</sup>。气孔是管道环焊缝中常见的体积型缺陷, 不仅会减小管道环焊缝的真实截面面积、降低气密性<sup>[3-4]</sup>, 还会引发材料强度和韧性下降<sup>[5-7]</sup>, 引起局部区域应力集中, 削弱管道环焊缝的抗变形能力。尤其是当气孔缺陷的尺寸达到一定极限时, 会在气孔截面处发生以脆性断裂为主导的失效<sup>[7-9]</sup>, 对管道的安全运营构成威胁。因此, 分析气孔缺陷对管道环焊缝结构应力状态的影响, 并以此为依据来确定管道环焊缝质量控制指标是至关重要的。

目前对焊缝气孔缺陷的研究主要集中于形成机制及控制措施<sup>[10-13]</sup>。在小尺寸试验中, 可以通过人工植

入缺陷的方法阻碍焊接, 在特定条件下形成气孔缺陷<sup>[14]</sup>, 但是却无法观测气孔缺陷周围的应力分布。为了准确描述气孔缺陷周围应力场的分布情况, 逐渐开始用有限元模拟方法研究结构的微观缺陷对宏观力学行为的影响<sup>[15-18]</sup>, 但此类研究仅局限于在微观尺度范围内探讨夹渣和气孔缺陷。对于管道中的焊缝气孔缺陷, 标准 API Std 1104 和 SY/T 4109 仅在尺寸控制方面做出了规定。然而, 随着长输管道朝着大口径、薄壁、高压力的方向发展, 高钢级管线钢的应用对管道环焊缝的质量控制提出了更高的要求<sup>[19]</sup>。针对高强钢管道的焊缝缺陷, 熊庆人等<sup>[20]</sup>使用二维有限元模型, 分析了缺陷尺寸和焊缝强度匹配系数对应力的影响。但是, 二维模型不足以反映环焊缝管道中气孔缺陷的三维特性。

鉴于高强钢管道环焊缝质量控制对确保管道安全十分重要, 而现有研究较少涉及含气孔缺陷的管道环

引用格式: 李燕, 帅健, 隋永莉, 许葵. 含气孔缺陷的管道环焊缝应力分析. 石油科学通报, 2016, 03: 417-424

LI Yan, SHUAI Jian, SUI Yongli, XU Kui. Stress analysis of circumferential pipeline weld seams with pore defects. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 417-424. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.037

焊缝应力分析, 缺乏针对高强钢管道环焊缝气孔缺陷尺寸控制的技术依据。本文根据工程实际中管道环焊缝的坡口形状及热影响区材料的软化现象, 建立了环焊缝气孔缺陷管道的数值计算模型。依据3种荷载条件下的模拟结果, 分析了气孔缺陷对管道环焊缝应力场分布的影响, 评价了现有标准中气孔缺陷尺寸控制指标的适用性, 对合理控制管道环焊缝焊接质量有一定的参考依据。

## 1 有限元模型

### 1.1 焊接坡口尺寸及形状

本文研究的管道尺寸为 $\phi 1219 \times 16.3$  mm, 焊接方式为半自动焊, 焊接坡口尺寸及对应的焊缝截面形状如图1和2所示。从焊缝的截面图中可以看出材料被分成了多个区域, 这是由于在焊接过程中, 受到较高的热输入作用, 材料的晶粒组织和性能发生明显的变化<sup>[21]</sup>, 引起不同性能材料的分区。中间部分是由填充金属和母材发生熔化凝固形成的焊缝区, 两端部分是焊接过程中材料未受影响的母材区, 介于管道环焊缝区和母材区之间的部分金属是热影响区, 由焊缝金属临近的部分母材被焊缝区金属的高温加热后形成。根据图1中的坡口尺寸, 将焊缝背面与母材交界处的焊根宽度取为4 mm, 焊缝表面与母材交界处的焊趾宽度取为16 mm, 热影响区宽度取为焊趾和焊根宽度的平均值, 近似为3 mm。在焊缝表面处有超出焊趾连线高度1 mm的熔敷金属, 这是为了增加焊缝截面积, 提高承载能力而形成的余高, 在本文分析中对此加以考虑。关于气孔缺陷的尺寸, 美国的API Std 1104标

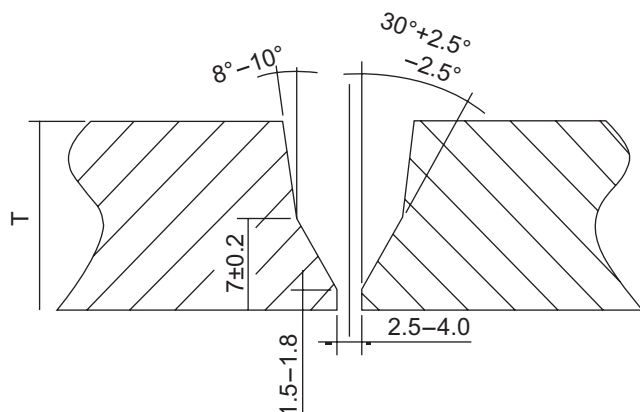


图1 焊接坡口尺寸(mm)

Fig. 1 Size of weld(mm)

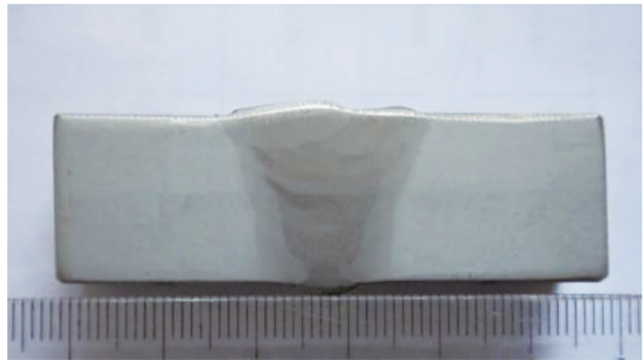


图2 焊缝截面形状

Fig. 2 The shape of cross section of weld

准中规定单个气孔缺陷的尺寸不能超过3 mm和管道壁厚的25%。我国的SY/T 4109标准借鉴了API标准的这项要求。限定单个气孔直径不能超过3 mm。本文中的气孔直径取为3 mm。

### 1.2 网格划分

使用ABAQUS大型有限元分析软件进行建模, 近似认为气孔缺陷呈规则的球形并位于管道环焊缝的中间位置。管道相对于气孔中心所在的横截面和纵截面对称, 故可取1/4管道进行建模分析。采取20节点六面体单元对模型进行网格划分。由于气孔周围应力梯度变化较大, 在气孔周围进行网格细化, 而对于管道远端, 由于距离气孔较远, 网格划分相对较为稀疏, 有限元模型如图3所示。

### 1.3 材料参数

材料在焊接时会受到多次热循环的作用, 引发焊缝及其与母材相邻区域材料的力学特性变化。在实际工程应用中, 使用焊缝强度匹配系数来表征材料由于焊接作用而发生的这种不均匀变化, 该系数可以通过试验测试得到。为了了解X80、X90钢级管道环焊缝的强度配合情况, 对多组管道环焊缝试件进行了试验测试, 以获取试件中焊缝、母材、热影响区3个部分材料性能的变化规律。测试结果显示焊缝的屈服极限较母材高10%~12%, 呈现高匹配系数焊接。采用这种焊接系数施焊可以充分利用管道环焊缝的抗变形能力。而热影响区在焊接热循环的作用下引起材料的微观结构变化, 形成软化区<sup>[22]</sup>, 导致强度与韧性下降。与母材区材料相比, 该部分材料的屈服极限下降了2%~10%。

基于试验测试得到的焊缝强度匹配关系, 本文以高匹配系数1.1进行计算, 即焊缝区材料的强度比母

材区高 10%，热影响区材料的强度比母材区低 10%。采用式(1)所示的 R-O 本构关系式来描述材料的应力-应变变化规律。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} = \frac{\sigma}{\sigma_s} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^n \quad (1)$$

其中， $\varepsilon$  表示应变； $\varepsilon_s = \sigma_s / E$ ， $\varepsilon_s$  表示屈服时对应的弹性应变， $E$  表示杨氏模量，MPa； $\sigma_s$  表示屈服极限，MPa； $\alpha$  表示屈服偏移， $n$  表示硬化指数。

管材级别为 X80 和 X90，屈服极限  $\sigma_s$  和强度极限  $\sigma_b$  取为 API-5L 中规定的最低值。在单向拉伸试验中，材料达到强度极限时的拉伸载荷需要满足关系式

$$dF = d(\sigma \cdot A) = \sigma dA + Ad\sigma = 0 \quad (2)$$

式中， $F$  为试验时拉伸载荷，N； $A$  为试件横截面面积，mm； $\sigma$  为真实应力，MPa。

对(2)变形后可得

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A} \quad (3)$$

由体积不变原理得

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (4)$$

将上式带入(1)式中即可根据  $\sigma_s$  和  $\sigma_b$  确定参数  $\alpha$  和  $n$ ，各部分材料参数如表 1 所示。

## 2 环焊缝载荷条件

对含气孔缺陷的管道环焊缝进行应力分析，需要建立载荷条件。首先，考虑到设计压力是运行过程中可能产生的最高压力，所以将设计压力下管道的内压确定为计算分析的基本载荷。其次，根据管道设计规范 GB50251，使用最大剪应力破坏理论对管道环焊缝进行强度校核，强度条件为

$$\sigma_T = \sigma_1 - \sigma_3 \leq 0.9\sigma_s \quad (5)$$

式中， $\sigma_T$  表示 Tresca 强度理论的当量应力，MPa； $\sigma_1$  表示最大主应力，MPa； $\sigma_3$  表示最小主应力，MPa。

管道在运行过程中处于两向应力状态，内压使环向产生拉伸应力  $\sigma_h$ ，而轴向应力  $\sigma_a$  既存在压缩应力

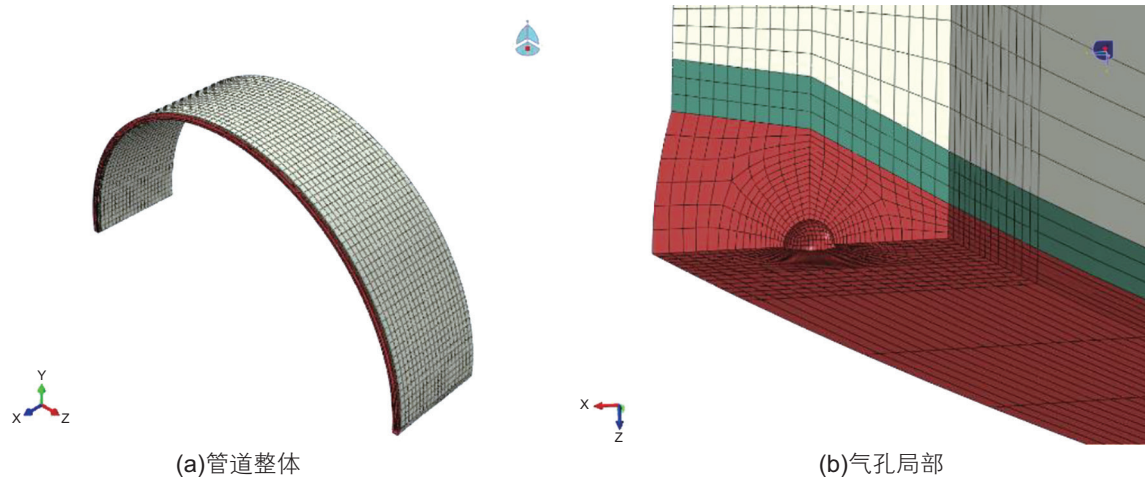


图 3 数值计算模型

Fig. 3 Finite element model

表 1 材料参数表

Table 1 material parameters

钢级	材料位置	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$E$ /MPa	$\alpha$	$n$
X80	热影响区	499.5	562.5	200 000	1.00	23.74
	母材	555.0	625.0	200 000	0.80	24.47
	焊缝	610.5	687.5	200 000	0.64	25.31
X90	热影响区	562.5	625.5	200 000	0.78	26.72
	母材	625.0	695.0	200 000	0.60	27.79
	焊缝	687.5	764.5	200 000	0.45	29.08



的情况,也存在拉伸应力的情况。由此确定在基本载荷作用下的拉、压两种极端载荷条件。

当管道的轴向应力为压缩力( $\sigma_a < 0$ )时,由:

$$\sigma_1 = \sigma_h = 0.72\sigma_s, \quad \sigma_3 = \sigma_a \quad (6)$$

可得:

$$\sigma_T = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_h - \sigma_a \leq 0.9\sigma_s \quad (7)$$

相应的轴向应力为:

$$\sigma_a \geq \sigma_h - 0.9\sigma_s = -0.18\sigma_s \quad (8)$$

即,管道轴向受压的极端载荷条件为设计压力与 $0.18\sigma_s$ 的轴向压应力的叠加。

当管道的轴向应力为拉伸力( $\sigma_a > 0$ )时,由:

$$\sigma_1 = \sigma_a, \quad \sigma_2 = \sigma_h = \sigma_a \leq 0.9\sigma_s, \quad \sigma_3 = 0 \quad (9)$$

可得:

$$\sigma_T = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_a \leq 0.9\sigma_s \quad (10)$$

即,管道轴向拉伸极端载荷条件为设计压力和 $0.9\sigma_s$ 的轴向拉应力的组合。

基于上述讨论,本文的应力分析在以下3种载荷条件下进行。

(1)基本载荷条件:设计压力12 MPa的内压;

(2)极端压缩载荷条件:设计压力12 MPa的内压与 $0.18\sigma_s$ 轴向压缩应力的叠加;

(3)极端拉伸载荷条件:设计压力12 MPa的内压与 $0.9\sigma_s$ 轴向拉伸应力的叠加。

### 3 失效判据

合理地确定失效判据需要对应力状态及材料性能

加以考虑。从应力状态的角度看,管道处于多向应力状态,其失效不再由单一的应力分量控制,而是受多向应力的影响,应当使用多向应力状态下的强度理论。在传统的强度理论中,von Mises强度理论考虑了3个主应力的影响,更加符合试验结果,所以本文应力分析取von Mises等效应力进行判定。

从材料性能的角度来看,塑性材料应力应变的关系是非线性的,随着塑性变形增大,材料抵抗塑性变形的能力也有所增加。Hahn等<sup>[23]</sup>考虑了材料的这种应变硬化特性,提出了流动应力的概念,并按照应力水平的高低,将流动应力的上下限定义为材料的强度极限和屈服强度。对于高钢级管道,材料性能提高的同时,管道的应力水平也有所增大,一般情况下,流动应力取为屈服强度和强度极限的平均值。

就缺陷类型来说,气孔属于制造环节产生的初始缺陷,所以,在本文的应力分析中,采用基于流动应力的失效判据对含气孔缺陷的管道环焊缝进行评估,既能有效利用材料,又可以保障结构安全。

## 4 结果分析

### 4.1 应力分析

根据第2节确定的基本、极端压缩和极端拉伸载荷条件,分别对管道进行有限元模拟。图4、5和6分别表示3种载荷条件下气孔缺陷周围的von Mises等效应力云图。从图中可以看出气孔会导致孔边应力明显增大,但影响范围限制在气孔周围较小的区域,不会

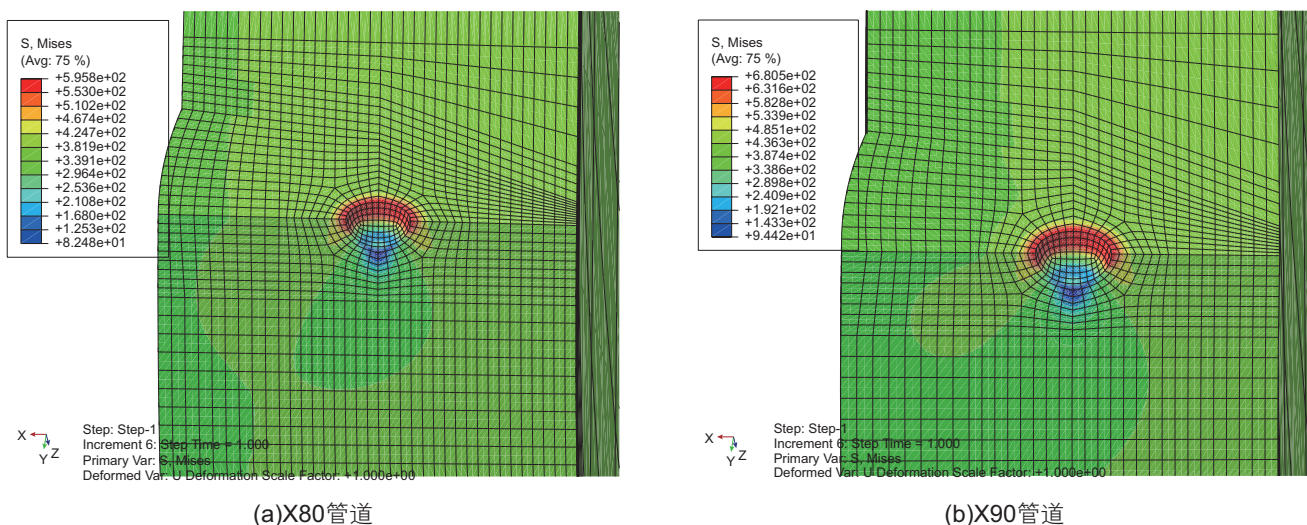


图4 基本载荷条件下气孔缺陷周围的 von Mises 等效应力云图

Fig. 4 The von Mises stress distribution of pipe under base loading condition

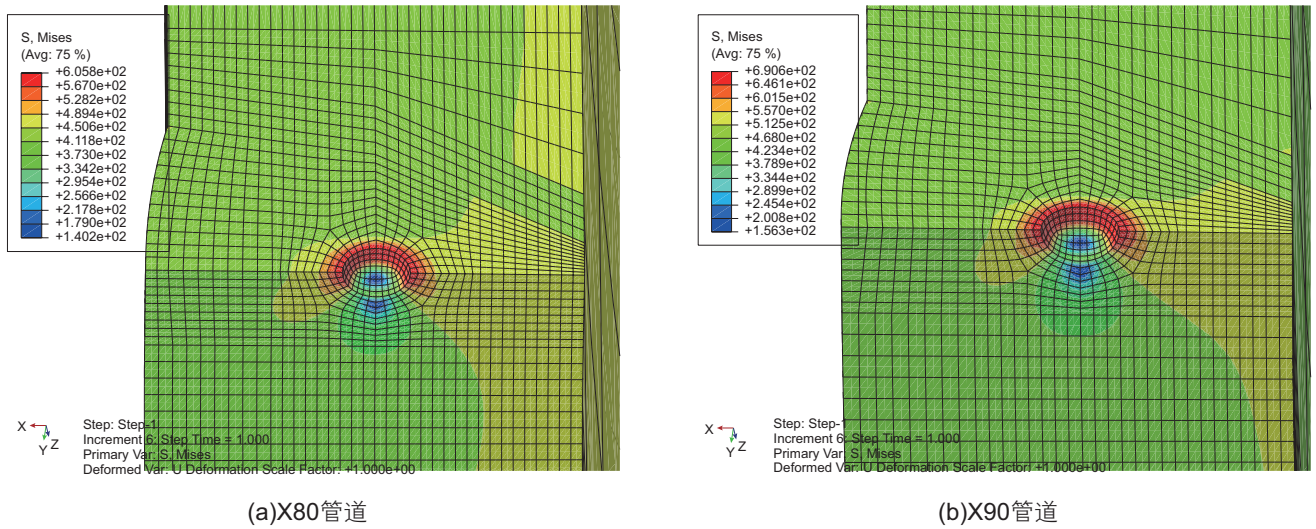


图5 极端轴向压缩载荷条件下气孔缺陷周围的 von Mises 等效应力云图

Fig. 5 The von Mises stress distribution of pipe under extreme compressive loading condition

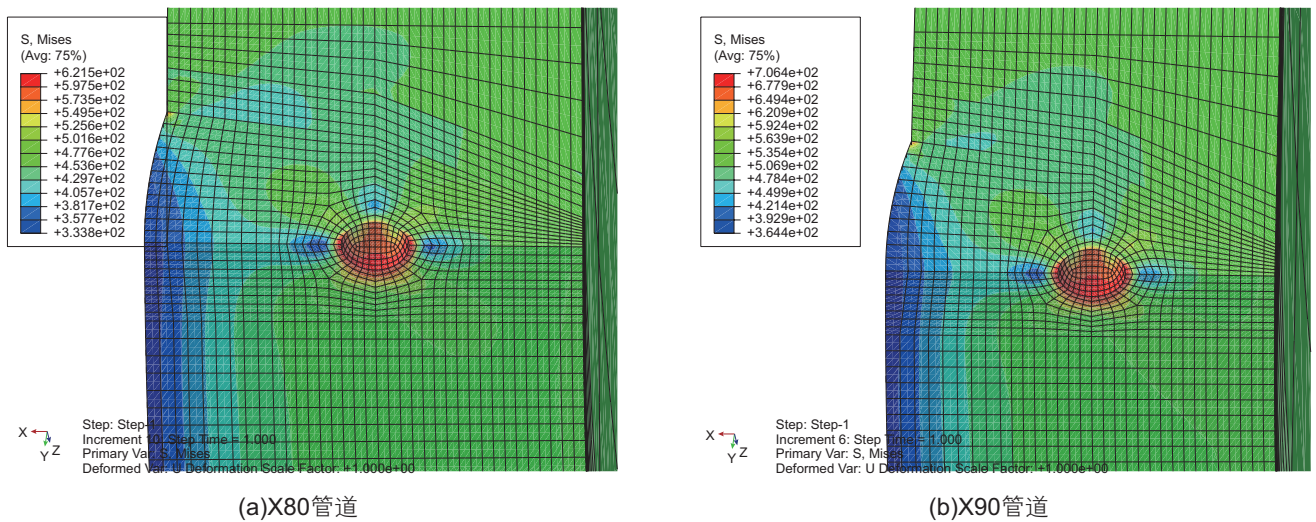


图6 极端轴向拉伸载荷条件下气孔缺陷周围的 von Mises 等效应力云图

Fig. 6 The von Mises stress distribution of pipe under extreme tensile loading condition

扩展到管道环焊缝内外表面,而管体其余部分的应力场分布均匀,在3种载荷条件下均未达到屈服。管道在设计压力12 MPa的设计压力作用下,内压引起管体膨胀,最大等效应力产生于管道纵向对称面的气孔边缘处。管道在设计压力12 MPa与0.18倍屈服强度的轴向压缩应力组合的极端轴向压缩载荷作用下,由于管道在轴向压缩载荷和内压的同时作用下发生膨胀,此时最大等效应力有小幅增长,但位置仍然位于纵向对称面的气孔边缘。管道在设计压力12 MPa与0.9倍屈服强度的轴向拉应力组合的极端轴向拉伸载荷作用下,轴向拉应力对管道的作用超过内压引起的环向应力的作用,管道最大等效应力的位置转移至横截面上的气

孔边缘处。各个载荷条件下管道的最大等效应力值与远端管体的平均应力值如表2所示,根据本文中所确定的失效判定准则,3种载荷条件下的最大 von Mises 等效应力均未超过失效判据规定的流动应力。除气孔局部区域应力增大外,管体其余部分的应力水平还都处于弹性范围内,说明对X80和X90钢级环焊缝管道来说,直径为3 mm的气孔缺陷是可以接受的。

#### 4.2 气孔位置的影响分析

为了分析气孔位置对管道应力状态的影响,以管壁横截面中线为界限分别建立位于中线内侧和外侧的气孔缺陷。两种位置气孔缺陷管道的应力分布与焊缝



中部气孔类似,气孔会导致气孔周边发生明显的应力增大,但影响范围较小不会扩展到管道环焊缝内外表面,管道其余部分应力场分布均匀,均未进入屈服。由表3的结果可以看出,内侧气孔的最大等效应力比外侧气孔稍高,但幅度不超过2%。这表明在焊缝中心界面处,沿径向气孔位置的变化对气孔局部及管体的应力分布几乎没有影响,气孔位置的影响可以忽略。

#### 4.3 不同钢级管道对比

对表4中所列出的X80和X90钢级管道中的最大von Mises等效应力与流动应力的比值对比可以看出,

随着管材钢级的升高,管道外径增大、壁厚减薄,导致管道的环向应力水平升高,在这些因素的共同作用下,X90钢级管道环焊缝对气孔缺陷的容限能力较X80钢级管道有所降低,并且已接近于失效判据所确定的流动应力参考值。

## 5 结论

本文针对管道环焊缝中最常见的气孔缺陷,以真实的焊接坡口尺寸为建模依据,结合热影响区材料的软化,建立了三维有限元模型,分析了3种载荷条件

表2 管道中不同位置处的 von Mises 应力

Table 2 The von Mises stress of pipe

载荷条件	钢级	最大等效应力/MPa	远端管体应力/MPa	
			有限元	理论值
基本载荷条件	X80	595.8	398.8	397.5
	X90	680.5	450.2	448.7
极端轴向压缩载荷条件	X80	605.8	454.0	455.7
	X90	690.6	513.2	514.3
极端轴向拉伸载荷条件	X80	621.5	452.8	457.1
	X90	706.4	510.6	515.1

表3 不同位置气孔缺陷管道的等效应力对比

Table 3 The comparison of von Mises stress

载荷条件	钢级	最大等效应力/MPa		
		焊内	焊中	焊外
基本载荷条件	X80	600.3	597.8	596.7
	X90	685.4	682.3	671.9
极端压缩载荷条件	X80	608.9	607.1	606.2
	X90	693.9	691.6	691.0
极端拉伸载荷条件	X80	628.4	625.6	621.5
	X90	713.9	710.1	706.4

表4 等效应力与流动应力对比表

Table 4 The comparison of stress ratio

载荷条件	钢级	最大等效应力/流动应力		
		焊内	焊中	焊外
基本载荷条件	X80	0.925 0	0.921 1	0.919 4
	X90	0.944 1	0.939 8	0.925 5
极端压缩载荷条件	X80	0.938 2	0.935 4	0.934 0
	X90	0.955 8	0.952 6	0.951 8
极端拉伸载荷条件	X80	0.968 2	0.963 9	0.957 6
	X90	0.983 3	0.978 1	0.973 0

下气孔缺陷对管道环焊缝应力场分布的影响, 由此得到了以下结论:

(1) 气孔缺陷会引起焊缝局部应力增大, 其位置与载荷条件有关, 但均未扩展至管道环焊缝的内外表面。在基本载荷和极端压缩载荷条件下, 由内压引起的环向应力占主导作用, 纵截面上气孔边缘处的应力增大最为显著。而当管道在极端拉伸载荷条件下, 拉应力的作用超过内压引起的环向应力作用时, 应力最显著的位置转移至横截面上的气孔边缘处。

(2) 对内、外侧及管壁中间位置的气孔进行应力分析发现, 沿径向的气孔位置变化不会显著影响气孔周

围的应力水平, 气孔径向位置的影响可以忽略。

(3) 对高匹配 0.72 设计系数的 X80 和 X90 钢级环焊缝管道, 在拉伸、压缩极端载荷条件下, 管道的最大等效应力均未超过失效判据规定的流动应力。因此 3 mm 的气孔缺陷尺寸控制指标适用于 X80 和 X90 钢级管道。

(4) 管道钢级提高后, 管道的外径相应增大、壁厚也有所减薄, 材料与几何尺寸的变化共同引起管道环向应力水平的提高, 在这些因素共同作用下使得高钢级管道的缺陷可接受水平降低。

## 参考文献

- [1] 隋永莉, 曹晓军, 胡小坡. 油气管道环焊缝焊接施工应关注的问题及建议[J]. 焊管. 2014, 72(5): 62-65. [SUI Y L, CAO X J, HU X P. Focus on problems and suggestions of oil and gas pipeline circumferential[J]. Welding Pipe and Tube. 2014, 72(5): 62-65.]
- [2] 逯燕玲. 油气输送管道对接焊缝中气孔的成因及控制措施[J]. 热加工工艺. 2009, 38(13): 169-171. [LU Y L. Formative factors and preventive measures of weld porosity in butt welding of oil & gas transmission pipeline[J]. Hot Working Technology. 2009, 38(13): 169-171.]
- [3] XIAO Q S, SHI M L. Study of pores produced in underwater wet-welding[J]. China Welding. 2006, 15(2): 40-43.
- [4] 刘世明, 沈晓勤. 深水湿法焊接气孔问题研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版). 1997, 25(03): 12-18. [LIU S M, SHEN X Q. Study of porosity produced in wet welding under deep water[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science). 1997, 25(03): 12-18.]
- [5] LU L, ZHAO H, CAI Z, et al. Influences of size and position of defects on the fatigue life of electron beam welded-aluminum alloy joints[J]. Frontiers of Materials Science in China. 2007, 1(2): 130-133.
- [6] PESSOA E C P, BRACARENSE A Q, ZICA E M, et al. Porosity variation along multipass underwater wet welds and its influence on mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2006, 179(1-3): 239-243.
- [7] ZHU M L, XUAN F Z, WANG Z, et al. Very high cycle fatigue behavior and life prediction of a low strength weld metal at moderate temperature[J]. American Society of Mechanical Engineers Pressure Vessels & Piping Division Pvp. 2012, 2(3): 317-329.
- [8] MAZAR ATABAKI M, MA J, LIU W, et al. Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel[J]. Materials & Design. 2015, 67: 509-521.
- [9] ÖRJASAETER O, HAUGE O J, BÄRS G, et al. Crack growth during full scale reeling simulation of pipes with girth welds[J]. ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2004: 193-199.
- [10] DAUGHERTY W L, CANNELL G R. Analysis of porosity associated with Hanford 3 013 outer container welds[J]. Practical Failure Analysis. 2003, 3(4): 56-62.
- [11] KATAYAMA S, KOBAYASHI Y, MIZUTANI M, et al. Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. Journal of Laser Applications. 2001, 13(5): 187-192.
- [12] KATAYAMA S, NAITO Y, UCHIUMI S, et al. Physical phenomena and porosity prevention mechanism in laser-arc hybrid welding[J]. Transactions. 2006, 35: 13-18.
- [13] NORRIS J T, ROBINO C V, HIRSCHFELD D A, et al. Effects of laser parameters on porosity formation: Investigating millimeter scale continuous wave Nd: YAG laser welds[J]. Welding Journal. 2011, 90(10): 198-203
- [14] STEPANOVA L N, KABANOV S I, RAMAZANOV I S, et al. Acoustic-emission testing of multiple-pass welding defects of large-size constructions[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015, 51(9): 540-545.
- [15] BOUAFIA F, BOUALEM S, AMIN M M E, et al. 3-D finite element analysis of stress concentration factor in spot-welded joints of steel: The effect of process-induced porosity[J]. Computational Materials Science. 2011, 50(4): 1 450-1 459.
- [16] FENG L. Effect of non-metallic inclusions on the local stress concentration within materials[J]. Journal of Mechanical Engineering. 2013, 49(08): 41.
- [17] PRASANNAVENKATESAN R, PRZYBYLA C P, SALAJEGHEH N, et al. Simulated extreme value fatigue sensitivity to inclusions and pores in martensitic gear steels[J]. Engineering Fracture Mechanics. 2011, 78(6): 1 140-1 155.

- [18] DONG H, LIAO C, YANG L. Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy gas metal arc weld[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012, 22(6): 1336-1341.
- [19] 章传国, 郑磊, 张备, 等. X90 大口径 UOE 焊管的开发研究[J]. 宝钢技术. 2013, (03): 30-34. [ZHANG C G, ZHENG L, ZHANG B, et al. Research and development of X90 large diameter UOE welded pipes[J]. Baosteel Technology. 2013, (03): 30-34.]
- [20] 熊庆人, 闫琳, 张建勋, 等. 高钢级管道环焊缝缺陷容限尺寸数值分析[J]. 焊管. 2013, (09): 25-29. [XIONG Q R, YAN L, ZHANG J X, et al. Numerical analysis of defect tolerance dimension in circumferential weld of high grade pipeline[J]. Welded Pipe and Tube. 2013, (09): 25-29.]
- [21] LI J, SHI K, ZHOU Y, et al. Research on the softening phenomena of HAZ in welded joint of coiled tubing[J]. Transactions of Jwri. 2012, 03: 115-117.
- [22] HOCHHAUSER F, ERNST W, RAUCH R, et al. Influence of the soft zone on the strength of welded modern hsla steels[J]. Welding in the World. 2012, 56(5/6): 77-85.
- [23] HAHN G T, SARRATE M, ROSENFELD A R. Criteria for crack extension in cylindrical pressure vessels[J]. International Journal of Fracture. 1969, 5(3): 187-210.

---

## Stress analysis of circumferential pipeline weld seams with pore defects

LI Yan<sup>1</sup>, SHUAI Jian<sup>1</sup>, SUI Yongli<sup>2</sup>, XU Kui<sup>1</sup>

*1 China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

*2 China Petroleum Pipeline Scientific Research Institute, Langfang 065000, China*

**Abstract** Welding quality control plays an important practical role in the safe operation of oil and gas pipelines. Especially for high grade pipelines, dimensional control of welding defects is the bottleneck problem in pipeline construction. During the important construction welding process, pore defects are one of the most unavoidable welding problems. To evaluate the applicability of standards specifying pore dimensions, non-linear finite element analysis models of circumferential pipeline weld seams with pore defects were modeled by considering the real structure of the welding seam and the softening of the heat affected zone. Based on the conventional strength theory for pipeline engineering design, three loading conditions of stress analysis are defined. The stress analyses are investigated based on the flow stress failure criterion. The results showed that the effect of the location along the wall thickness of the pipe is not so significant, and compared with X80 grade line pipe, the tolerance of pore defect size in X90 grade line pipe is stricter. A 3 mm pore diameter is acceptable for X80 and X90 circumferential pipeline weld seams.

**Keywords** circumferential pipeline weld seam; pore defect; extreme load condition; stress analysis; defect dimension

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.037

(编辑 马桂霞)